ロボット教示作業支援のための複合情報 GUI の開発 — 正確な動作点教示のための力情報利用の検討 —

Composite Information Display for Assistance of Online Robot Teaching -Utilization of Force Information for Teaching Accurate Motion Points-

○黒野晃平 堀口由貴男 中西弘明 榎木哲夫 (京大) 野田哲男 (三菱電機)

Kohei KURONO, Kyoto University, kuro-hei@t04.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

Yukio Horiguchi, Hiroaki Nakanishi, Tetsuo Sawaragi, Kyoto University

Akio Noda, Mitsubishi Electric Corporation

Abstract—Conventional methods of online robot teaching have difficulty for the teaching operator to detect accurate positional errors between the hand and a workpiece. For the purpose of developing practical supports for online robot teaching, this study investigates information requirements of the operator's work and then discusses their effective visualization of data from a camera and a force sensor attached to the robot's wrist. Hierarchical Task Analysis is applied to the operator's task in defining positions and postures of the hand against actual workpieces, to extract specific pieces of information or relationship that should be incorporated into the visual assistance. Considering these information requirements, we propose a GUI to visualize the force information in order to find accurate motion points effectively. The proposed GUI can help the operators to figure out motion points more precisely, and can reduce the amount of time for robot teaching.

Key Words: Industrial Robot, Online Robot Teaching, User Interface

1. はじめに

産業用ロボットの動作プログラムには現物に合った動作点の情報が必須であり、その情報を入力するオンライン教示作業が必要である。しかし、教示点の正確さに加え、自動運転実行時の対象物の形状や位置のばらつきやシステム内の他の装置との干渉など、多くの事項を考慮しなければならないため、作業の完全なオフライン化が困難であり、ティーチングペンダントと呼ばれる操作デバイスを用いた現物合わせが不可欠となっている。現在、現物合わせによる位置決め作業は作業者の目視による判断にもっぱら依存しているが、前述の問題点を考慮しながらの作業には多くの試行錯誤が必要であり、作業者の技量が教示に要する時間や教示された動作の質に大きく影響する。変種変量生産を効率的に行うためには生産機種種の迅速な切り替えが望まれるが、動作教示の複雑さや難しさがそのような柔軟性をもった自動ロボットによる作業工程の実現のボトルネックとなっている。

上述の問題を解決するために、本研究ではロボットの位置情報やロボットの手首に装備されたカメラや力覚センサからの情報を複合的に利用し、教示作業を効率化するための情報可視化技術の開発に取り組む。これまでに我々は、UI設計の基礎理論にエコロジカル・インタフェース・デザイン (Ecological Interface Design) の理論 [1] を用いた、教示作業の効率化のために提示すべき情報 (情報要件: Information Requirements) の特定と、それに基づいた位置姿勢誤差の可視化方法についての検討を行っている [2][3]。本稿では、ロボットの手首に装備した力覚センサからの情報を利用した、動作点教示作業支援 UI を提案する。

2. 教示作業の分析と情報要件

教示作業の効率化のための情報要件を特定するために、現行の動作点教示作業のタスク構造を分析した。ここでは、ワークの把持や把持ワークを所定の場所に挿入するといった、ツールとワーク間で物理的な接触が発生するロボット動作の教示を対象とした。分析には Hierarchical Task Analysis (HTA) [4] の手法を利用し、作業をタスクの階層として整理した。

図 1 に分析結果を示す。動作点教示の作業は大きく次の 4 つの段階に分けられる。

- ① 目標教示位置 (ワーク) 上方にツールを移動させる
- ② 目標教示位置上方でツールの位置と姿勢を調節する
- ③ ツールとワークが近接した状態でツールの位置と姿勢を調節する
- ④ ツールとワークを接触させてみることで調節の正確さを調べる

意図せぬ接触や衝突の危険を極力小さくするために、ツールの位置と姿勢の大きな操作はワークから距離をおいた場所で実行される (②)。しかし、そこで位置と角度の誤差を正確に知覚することは困難なため、ワークに近接させた状態での確認が必要になる (③)。さらに、より精密な誤差の検知にはツールとワークが接触することで発生する変位の具合を確認する必要がある (④)。そして、誤差は③ (場合によっては②) の段階に戻って解消が試みられる。

以上の作業を効率化するには、

- (A) ②と③の段階での試行錯誤の削減
- (B) ④の段階で検知する誤差情報の不確かさの低減と、その情報の効果的な利用

Fig. 1 The hierarchical relationship among the tasks for defining positions and postures of the hand against actual workpieces

Fig. 2 The prototype user interface visualizing positional and postural errors of the hand

が重要になる。

目標 (A) については、位置・姿勢の調節の基準を可視化して、解消すべき誤差を作業者に明示することが有効と考える。特に、ワークから距離のある②の段階で素早く誤差が低減されることが、その後の作業量の削減に大きく貢献するはずである。これに関して、ハンドの目標教示位置に対する相対的な位置関係を、図 2 に示すようなカメラ画像に付着する仮想物体のワイヤフレーム像として可視化する方法を提案している [2]。また、奥田らの提案する 3 次元画像処理技術 [5] から得られる指定ポイントの 3 次元座標や、ワークの CAD データから得られる位置情報をハンドの目標教示位置に設定することによって、実際の教示作業に適用可能なシステムの構築を検討している。

一方、目標 (B) については、ハンドの開閉によって一瞬で発生した変位の方向や大きさを目視で的確に検知することは困難であるため、それを補う情報の提供が

望まれる。

3. 力情報可視化の設計

特定された情報要件に基づいて、目標 (B) を達成するための情報可視化の設計について検討する。

3.1 現行の教示作業の問題点

現行の目視による教示作業によって目標 (B) を達成する上での問題点として、以下の 2 点が挙げられる。

1 点目は、ハンドの開閉によって発生する一瞬の変位を目視によって検知しなければならない点である。ハンドの開閉によって発生する変位は極めて小さいため、そのような変位を知覚するには作業への習熟が必要となる。加えて、視野に対して奥行き方向の変位の知覚は熟練作業者であっても難易度が高く、見る場所や方向をさまざまに変えながらハンドの開閉を繰り返さなければならない。教示点を精確に教え込むためには少なくとも 2 方向からの変位の知覚が必要となるが、ハンド周りの物理的な制約によっては 2 方向から確認することが困難な場合もある。そのような場合には、試行錯誤を繰り返して適切な教示点を探し出さなければならない。

2 点目として、たとえ変位を知覚できたとしても、その変位の発生原因が位置誤差と姿勢誤差のどちらにあるのかを目視で判断することが困難であることが挙げられる。そのため、誤差を低減するためには、ハンドを微量移動させる作業とハンドの開閉による変位の変化の確認作業を試行錯誤的に繰り返す必要があり、作業に多大な時間と労力を要する。

教示作業の効率化には、これらの問題を解決する新たな情報を入手しなければならない。

3.2 力覚センサ情報の利用

本研究では、目標 (B) の達成を支援するための情報源として、ロボットの手首に取り付けた力覚センサを

(a) Robot

(b) A peg and a block with holes

Fig. 3 Experimental apparatuses

利用する。力覚センサとしては、各軸方向の力3成分、各軸まわりのモーメント3成分を同時に連続的かつリアルタイムに検出できるものを想定している。

力覚センサの情報を利用することによって、目視では一瞬で検知しなければならない変位を力情報として持続的に検知することができる。そして、その値の時系列的な変化の軌跡を見ることにより、微小な変位を把握することが可能となる。また、力とモーメントの成分を組み合わせることで利用することによって、変位の原因の所在を明らかにすることができると考えられる。このように、力情報を効果的に利用することができれば、ロボット動作の質に深く関わり、作業への熟練を要する「ラスト・ワン・インチ」の教示作業を簡易化することができると思われる。

3.3 検証環境

本研究では、検証環境として、図3に示すような「ペグ・イン・ホール」の教示作業を設定した。そして、第2章で示した動作点教示の作業の段階の④に相当する、ホールにペグを挿入し終わった状態での位置・姿勢誤差の低減に焦点を当てる。力覚センサはロボットの手首に取り付け、ハンドの軸方向を z 軸とした。今回は円柱状のペグを想定しているため、ペグの軸周りのモーメント(z 軸周り)は検討の対象に入れていない。

ロボットアームは三菱電機製 MELFA RV-6SL を使用し、力覚センサはニッパ製 IFS-67M をロボットの手首に取り付けている。

3.4 作成した UI

作成した UI を図4に示す。ロボットの手首に取り付けたカメラの映像に、力情報が重畳されて表示されている。画面中央を原点として、図中に表示された緑色の点が力を、赤色の点がモーメントを表している。横軸に x 軸方向の力 F_x と y 軸周りのモーメント M_y を取り、同様に縦軸には F_y と M_x を取った。画面中央の白色の円は力とモーメントの許容範囲を表し、白色の円内に点を移動させることによって、手首に生じる力とモーメントを基準値以下にすることができる。

ハンドが把持したペグとホールの軸の角度が揃っている場合は、力とモーメントの点を同時に原点に移動させることが可能であるが、軸の角度がずれている場合は、双方の点を同時に原点に合わせることができな

Fig. 4 The prototype user interface visualizing forces and moments working on the robot's wrist

い。この情報を知覚することによって、作業者は変位の発生原因が位置誤差と姿勢誤差のどちらにあるかを知ることができる。

4. 実験による UI の評価

本章では、前章で作成した UI の有用性を検証するためにに行った実験の概要と、その結果について述べる。

4.1 実験設定

実験者が指定した作業開始点から、被験者が自動運転時の動作点として最適だと感じる地点までの教示を力覚センサからの情報がある場合とない場合で行い、その効率性の比較を行った。3つの地点を作業開始点として準備し、それをランダムに使用した。評価値として、教示作業に要した時間と、教示点の精度を評価するために教示終了時の力覚センサの値を用いた。本実験では、簡単化のため、 z 方向の移動と回転については行わず、 x 、 y 方向の移動と回転の4自由度を用いた。ジョグモードは LOW を使用し、ジョグ操作によるハンドの移動は並進方向については 0.01mm を、回転方向については 0.1deg を単位とした。また、UI を用いる際の許容範囲として、力の絶対値が 1.0N 以下、モーメントの絶対値が 0.15Nm 以下と設定した。ペグの大きさは直径 40mm 、深さ 25mm のものを用い、ペグとホールのギャップは $10\text{ }\mu\text{m}$ で、それぞれ $c0.5$ で面取りされて

Fig. 5 The average time needed for teaching accurate motion points

Fig. 6 The average value of force and moment working on the robot's wrist

いる。

4.2 実験結果

UIを用いた教示の際は教示作業の経験がほとんどない人3名で計9試行を、UIを用いない従来方法の教示の際は教示作業を経験したことのある中級者1名で6試行をそれぞれ行った。なお、被験者には実験開始前にティーチングペンダントの使用方法についての簡単なガイダンスを行った。教示終了までに要した時間の平均値を図5に、教示終了時に生じていた力とモーメントの平均値を図6に示す。図中のひげ線はそれぞれの標準偏差を表す。

図5と図6の結果より、UIを用いて教示を行う場合の方が、作業達成までに要する時間は短く、生じる力とモーメントは小さいことが確認された。つまり、力情報は教示作業を短時間で精確に行うための有益な情報となると言える。また、UIを用いることによって教示作業の初心者が中級者以上の結果を出すことができた点から、UIが作業の熟練以上に作業の効率化に効果をもたらすと考える。

4.3 UI改良の検討

教示作業の観察や実験後のインタビューから、UIを利用した教示作業において、図7に示すような、力とモーメントの点が画面に対して垂直または水平に並ぶ状態を意識して作業をしていることが明らかになった。つまり、作業者は2点をそれぞれ別個に原点へ移動させようとしているのではなく、原点上で力とモーメントの2点が重なり合うように移動させていた。移動や回転の操作を加えた際の2点の移動速度は異なり、移

Fig. 7 The force and moment points lined up vertically

動量と力情報の関係は非線形であるため、それらを考慮して操作に対する変化が知覚しやすいポイントに注目して作業をしていると考えられる。このような操作と変化の対応関係を作業者により分かりやすい形で表示することが今後の課題である。

5. おわりに

本研究では、産業用ロボットの動作点教示のタスク構造の分析から得られた情報要件をもとに、現行のオンライン教示作業の問題点を明らかにし、力センサの情報をを用いた教示作業支援技術を開発した。そして、その有効性を被験者実験によって確認した。

謝辞

本研究の成果は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務である次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトにより得られたものである。記して敬意を表する。

文 献

- [1] K.J. Vicente and J. Rasmussen. The ecology of human-machine systems II: Mediating "direct perception" in complex work domains. *Ecological Psychology*, Vol. 2, pp. 207-249, 1990.
- [2] 黒野晃平, 堀口由貴男, 中西弘明, 榎木哲夫, 野田哲男. 手先カメラを用いたロボット教示作業を支援する情報可視化. 第52回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 303-304, 2008.
- [3] 堀口由貴男, 黒野晃平, 中西弘明, 榎木哲夫, 野田哲男. ロボット教示作業支援のための複合情報 GUI の開発: タスク分析による情報要件の抽出と可視化の検討. 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 201-202, 2008.
- [4] A.J. Dix, A. Dix, J. Finlay, and G.D. Abowd. *Human-Computer Interaction*, chapter 15. Prentice Hall, 2004.
- [5] 奥田晴久, 野田哲男, 北明靖雄, 堀口由貴男. 画像インターフェースを用いたロボットへの直感的作業教示手法. 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 203-204, 2008.